Aplicación de la Técnica del Hilo Caliente Volador en la Detección y Medición del Flujo Axial Inverso

Tiburcio Fernández-Roque, José F. Vázquez-Flores, Jorge Sandoval-Lezama

I.P.N.-SEPI-ESIME Ticoman, Av. Ticoman No. 600, Col. San José Ticoman, 07340 México D.F.- México (e-mail: tfroque@yahoo.com.mx)

Recibido Jul. 14, 2010; Aceptado Ago. 16, 2010; Versión Final recibida Oct. 20, 2010

Resumen

Se determina la existencia del flujo axial inverso que se genera en el núcleo del torbellino en flujo a través de tubos de sección transversal circular. Se analiza algunas contradicciones relacionadas con la detección y medición de dicho flujo axial inverso y se estudia la factibilidad de medirlo con la técnica del hilo caliente volador. Con dicha técnica, el flujo inverso fue detectado hasta una posición radial de 3 cm. Sin embargo, dicho flujo es intermitente y la posición axial en la que se presenta no es la misma en cada posición radial. Por lo anterior, no es posible elaborar una distribución radial de la velocidad axial empleando un solo sensor. Finalmente, se concluye que el flujo inverso intermitente detectado es semejante al flujo recirculante que se genera en la estela de un cuerpo en movimiento.

Palabras clave: Flujo axial inverso, técnica del hilo caliente volador, flujo en torbellino.

Detection and Measurement of the Reversal Axial Flow with the Flying Hot Wire Technique

Abstract

The existence of reversal axial flow induced in the center of a swirling flow through ducts of circular cross section is determined. Some contradictory statements found in the literature related with the detection and measurement of such reversal axial flow are analyzed and the feasibility of measuring it using the flying hot wire technique is studied. With this technique, the reversal axial flow was detected up to a radial position of 3 cm. However, such flow was intermittent and its axial position was not the same in each radial position. Therefore, it is not possible to make a radial distribution of the axial velocity using one sensor only. Finally, it is concluded that the intermittent reversal axial flow is similar to the recirculation flow that is generated in the wake of a body in movement.

Keywords: Reversal axial flow, flying hot wire technique, swirling flow.

INTRODUCCIÓN

El flujo en torbellino ha atraído la atención de la comunidad científica en años recientes debido a la gran variedad de estructuras de flujo que generan y a que sus aplicaciones son muy diversas (Benisek et al. (2010)). En un extremo del espectro de aplicaciones se encuentran las relacionadas con la comprensión, predicción y control de flujos en torbellinos que ocurren en forma natural en fenómenos tales como remolinos, tornados, trombas y huracanes. En otro extremo se encuentra la generación deliberada de flujos en torbellino aplicada a diversos desarrollos tecnológicos. Una de las aplicaciones mas extendidas es en la estabilización de flamas en hornos, calderas y cámaras de combustión, en donde el flujo en torbellino mezcla al combustible y al aire en una zona de flujo recirculante que provoca una flama compacta y estable. Otros desarrollos tecnológicos en los cuales el flujo en torbellino desempeña un papel importante son los separadores de agua-aceite y los separadores ciclónicos de partículas sólidas. Adicionalmente y de acuerdo con Chang y Dhir (1995), el flujo en torbellino mejora la transferencia de calor encontrándose incrementos entre 6 y 8 veces en el coeficiente de transferencia local y entre 20 y 40 % de mejoría en la transferencia de calor global.

Vyas y Majdalani (2003) indican que entre los aspectos relevantes del flujo en torbellino que aún requieren mayor investigación y análisis se encuentran los fenómenos conocidos como rompimiento del vórtice (vortex breakdown) y el flujo axial inverso inducido, este último es el tema que se analiza en el presente trabajo.

El flujo en torbellino en el interior de un tubo de sección transversal circular presenta un campo de velocidades tridimensional aunque la componente radial es pequeña comparada con las velocidades axial y tangencial por lo que generalmente se acepta que el flujo en torbellino es un flujo bidimensional axial-simétrico como se muestra en la fig. 1. La componente de velocidad que tiene mas influencia y que establece las características únicas del flujo en torbellino es la componente tangencial. La distribución radial de dicha velocidad va evolucionando conforme el flujo se mueve corriente abajo. El perfil de velocidad tangencial tiende a desaparecer mientras que el perfil de velocidad axial tiende al perfil típico del flujo turbulento desarrollado en un tubo.

El flujo en torbellino se caracteriza por el parámetro adimensional Intensidad del Torbellino, Ω , definido como el flujo de cantidad de movimiento angular adimensional y que de acuerdo con Kitoh (1991) se calcula con la siguiente fórmula:

$$\Omega = 2\pi\rho \int_0^{r_0} \frac{UWr^2 dr}{\rho\pi r_0^3 U_m^2} \quad (1)$$

en donde U , W y U_m son las velocidades medias axial, tangencial y general, respectivamente, r y r_0 son la posición radial y el radio del tubo, respectivamente y ρ es la densidad del fluido.

Fig. 1: Perfil de velocidad de un flujo en torbellino. (Tomada de Kitoh (1991))

Bajo ciertas condiciones dinámicas que dependen del número de Reynolds (R_e) y de la intensidad del torbellino (Ω), un flujo en torbellino que se conduce a través de un tubo de sección transversal circular genera un fenómeno conocido como rompimiento del vórtice, el cual pasa por diversas transiciones hasta que para un cierto valor de intensidad del torbellino se forma una especie de burbuja que se asemeja a un cuerpo de revolución imaginario colocado en el centro del tubo que se caracteriza por tener varios puntos de estancamiento libres en el eje de la burbuja y ser una zona de flujo recirculante (Sarpkaya (1971)). Si se continua incrementando la intensidad del torbellino, la burbuja se mueve corriente arriba, lo cual provoca que el tubo completo se llene con una región de flujo inverso que se ubica en el núcleo del torbellino (a lo largo del eje del tubo), situación que ya no cambia mientras se mantengan las condiciones del flujo (R_e y Ω). De acuerdo con Harvey (1962), la aparición del rompimiento del vórtice establece la separación entre dos tipos de flujo en torbellino: aquellos que presentan flujo axial inverso y los que no lo presentan.

MEDICIÓN DEL FLUJO AXIAL INVERSO

Con base en la revisión de diversos artículos de investigación relacionados con el flujo en torbellino en tubos de sección transversal circular, se determinó que existen desacuerdos en cuanto a la detección y medición del flujo axial inverso que se induce en el núcleo del torbellino ya que existen discrepancias entre los resultados reportados y en algunos casos resultados totalmente contradictorios incluso empleando sistemas de anemometría y experimentos semejantes. Los desacuerdos entre las referencias consultadas respecto al flujo axial inverso se resumen a continuación:

a).- Un primer desacuerdo es el relacionado con el valor de la intensidad del torbellino para el cual aparece el flujo inverso. El menor valor de la intensidad de torbellino para el cual se reporta flujo inverso es de 0.42 (Kitoh (1991)), sin embargo algunas referencias aun generando valores de intensidad de torbellino mayores a 0.42 no reportan el flujo inverso, como Chen et al. (1999) y Moene (2003). Además estos autores reportan que la velocidad axial en el eje del tubo aumenta en lugar de disminuir, esta se incrementa desviándose ligeramente del perfil turbulento típico para el flujo desarrollado en un tubo.

b).- Otro desacuerdo es en lo que se refiere a la instrumentación para detectar el flujo inverso, ya que Chang y Dhir (1995) y Kitoh (1991) empleando sensores de presión total lograron determinar la dirección del flujo en la región de flujo inverso, mientras que Widmann et al. (1999) empleando un sensor de presión de 5 orificios y Fernández (2003) empleando un tubo Pitot-estático concluyen que en la región del núcleo del torbellino, el instrumento no se puede alinear con el flujo, es decir, no se puede encontrar la dirección del flujo medio, por lo que estos autores no reportan mediciones del flujo inverso.

Empleando anemometría Láser-Doppler, Moene (2003) no reporta el flujo inverso mientras que Chang y Chen (1993), muestran mediciones realizadas por P. A. Dellenback, empleando un sistema de anemometría semejante al utilizado por Monee (2003), en las cuales si se reporta flujo inverso.

Con respecto al sistema de anemometría a temperatura constante (CTA), se encuentra también que Chang y Dhir (1995), empleando sensores de hilo caliente unidimensionales y Kitoh (1991) empleando sensores de hilo caliente bidimensionales en X reportan el flujo inverso, mientras que Fernández (2003), empleando el mismo tipo de sensor que Chang y Dhir (1995), reporta que no pudo medir el flujo inverso. De igual forma, Cantrak et al. (1997), empleando sensores de hilo caliente tridimensionales tampoco reportan el flujo inverso.

Brunn (1995) señala que el flujo axial inverso inducido por un flujo en torbellino no se puede medir a través del registro de la presión estática y total empleando un tubo Pitot ni con anemometría de hilo caliente empleando sensores convencionales estáticos, recomienda entre otras técnicas la del hilo caliente volador.

La medición exacta de flujos altamente turbulentos y de flujos inversos ha sido limitada por la incapacidad de las técnicas de medición para tolerar amplias fluctuaciones en el ángulo con el cual incide el flujo y en particular por la aparición de flujos inversos, es decir, en sentido contrario al flujo medio general. La medición con sensores de hilo caliente fijo, ofrece alta exactitud con flujos en que la intensidad de la turbulencia es baja, pero está limitado en el rango de ángulos de flujo, los cuales no pueden ser medidos en forma exacta, tal y como lo mencionan Chang y Dhir (1995), Brunn (1995) y Kelso et al. (1994). Adicionalmente, Brunn (1995), Watmuff et al. (1983) y Persoons et al. (2006) establecen que el sensor de hilo caliente fijo es incapaz de medir flujos inversos debido a un problema de ambigüedad direccional que presenta el sistema de adquisición de datos al rectificar los voltajes que se miden. Una forma de extender el rango de aplicaciones de la anemometría de hilo caliente es mover el sensor a una velocidad relativamente alta en contra del flujo que se quiere medir. Con una velocidad suficientemente alta, el flujo inverso y flujos con alta turbulencia serán detectados por el sensor que se mueve como pequeñas perturbaciones, por lo tanto, el sensor es capaz de medir con gran exactitud. Kelso et al. (1994) establece que la técnica del hilo caliente volador permitió que las estelas turbulentas detrás de diversos cuerpos romos fueran medidas por primera vez en forma exacta.

En lo que sigue se presentan los detalles de dicha técnica así como la descripción de los trabajos realizados para implementarla y las mediciones realizadas para analizar el flujo en torbellino a través de un tubo de sección transversal circular. Por las características del equipo que genera el flujo en torbellino, el sistema que se adaptó para analizar dicho flujo permite realizar mediciones en los 20 cm finales del tubo y 35 cm fuera del tubo (en el chorro en torbellino que se genera cuando el flujo abandona el tubo).

SISTEMA DE ANEMOMETRÍA DE HILO CALIENTE VOLADOR

La técnica del hilo caliente volador (FHWA, por sus siglas en inglés) ha sido utilizada desde la década de los años 1960 y consiste de un sensor de hilo caliente uni o bidimensional que se mueve con una trayectoria y una velocidad conocidas, U_p , tal que la velocidad relativa, $U_{rel}=U-U_p$, permanece dentro de la región de reconocimiento válida del sensor. Luego la velocidad del flujo, U , es

$$U = U_{rel} + U_p \quad (2)$$

Para el caso unidimensional, la velocidad del sensor debe ser en contra de la dirección del flujo y de mayor magnitud que la velocidad del flujo inverso. Los sistemas FHWA se clasifican en función de la trayectoria generada; en particular los sistemas lineales han sido utilizados por diversos autores tales como Cole y Glauser (1998) y Tinney et al. (2006) quienes realizaron mediciones en una expansión brusca eje-simétrica, Kelso et al. (1994) que estudiaron la velocidad en la estela de un escalón y Watmuff et al. (1983) quienes estudiaron la separación del flujo y zonas de recirculación atrás de cuerpos romos. No se han encontrado trabajos que apliquen la técnica del hilo caliente volador a la medición del flujo axial inverso generado por un flujo en torbellino que circula por un tubo de sección transversal circular.

En nuestro caso, la trayectoria escogida es una línea recta producida por un motor lineal que más adelante se describe. Por lo anterior, con respecto a un sistema coordenado xy en el que el eje x positivo es horizontal y hacia la derecha, la velocidad del sensor será en sentido x negativo mientras que la velocidad relativa (considerando el sensor fijo) tendrá una velocidad en sentido x positivo si la velocidad del flujo es en sentido x positivo ó bien si la velocidad del flujo inverso es menor que la velocidad del sensor. En el caso de un flujo en sentido x positivo, la velocidad relativa, U_{rel} , es mayor que la velocidad del sensor U_p y la resultante, U , tendrá sentido positivo. En el caso de un flujo inverso menor que la velocidad del sensor, la velocidad relativa es menor que la velocidad del sensor y al realizar la suma vectorial indicada por la ecuación (2), la resultante tendrá signo negativo, es decir el flujo va en sentido x negativo. Resulta obvio que si el flujo inverso es mayor que la velocidad del sensor, la velocidad relativa tendrá sentido x negativo y aparece nuevamente la ambigüedad en la rectificación de la señal y la técnica ya no es aplicable.

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO EXPERIMENTAL

Dispositivo para generar el flujo en torbellino

El equipo empleado para generar el flujo en torbellino se muestra en la fig. 2 y se ubica en el Laboratorio de Hidráulica e Ingeniería Térmica Aplicada (LABHINTAP) de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica del I.P.N. Consta de un ventilador axial de seis aspas de 0.300 m de diámetro accionado por un motor monofásico de 0.125 H.P. y un reóstato que permite regular las rpm del motor en el rango de 400 a 4800 rpm. El ventilador está acoplado con una tobera metálica a un tubo de sección transversal circular que tiene un diámetro interno de 0.184 m y 1.300 m de longitud. El conducto está formado por tres tramos de tubos, los dos tramos de los extremos son fijos y miden 0.300 m y 0.250 m y el tramo central mide 0.750 m y puede girar, aunque esta facilidad no fue empleada. Con el fin de generar el flujo en torbellino, al ventilador se le quitaron los enderezadores de flujo. Se utilizó la velocidad mínima de giro del ventilador (400 rpm) ya que con esta velocidad se logra una intensidad de torbellino grande estimada en 0.93 y una velocidad media general de flujo baja (0.42 m/s) adecuada para la velocidad del servomotor lineal.

Sistema de anemometría de hilo caliente y dispositivo para mover el sensor

El sistema de anemometría de hilo caliente a temperatura constante (CTA) utilizado es el denominado *Streamline* fabricado por *Dantec*, el cual utiliza el software denominado *Stream ware* para el procesamiento de las señales obtenidas. El sensor unidimensional empleado es el 55P11. Para la adquisición de datos se utilizó una frecuencia de 1 khz, con lo cual se obtiene un valor de velocidad cada milisegundo.

El dispositivo seleccionado para mover el sensor de hilo caliente es un equipo fabricado por la empresa Yaskawa denominado Sigma Trac Linear Servo System, el cual consiste de un servomotor lineal que está compuesto de una bobina móvil formada por un núcleo de hierro laminado y de una guía magnética fija. El control del servomotor se realiza mediante un servo amplificador modelo Sigma II y del controlador Legend-MC, ambos marca Yaskawa. Este sistema funciona con corriente alterna de 125 volts, tiene una potencia de 125 Watts, una aceleración máxima de 50 m/s² y una velocidad máxima de 3 m/s en la carrera en contra del flujo en torbellino. La velocidad de regreso es más lenta y no se utiliza para realizar mediciones, es decir la operación del servomotor no es continua. En la figura 2 se muestra la instalación completa.

La velocidad del servo-motor lineal es la velocidad con que se mueve el sensor de hilo caliente, por lo que esta debe tener una velocidad constante durante el mayor tiempo posible del viaje. Puesto que la velocidad máxima de 3 m/s solo se logra por poco tiempo se decidió emplear la velocidad de 2 m/s ya que esta se mantiene durante 0.18 s, de un tiempo total de la carrera de 0.379 s, como se muestra en la fig. 3.

Fig. 2: Equipo experimental.

Fig. 3: Velocidad del servo-motor lineal, U_p .

RESULTADOS

La detección y medición del flujo inverso se realizó a partir de la medición de la velocidad relativa instantánea para diversas posiciones radiales. En la fig. 4 se muestra la velocidad axial relativa para la posición radial 0 cm, es decir, la correspondiente al eje del torbellino, la cual se obtuvo utilizando una frecuencia de adquisición de datos de 1 khz. La velocidad del flujo para cada instante se obtiene restando a la velocidad relativa la velocidad del sensor, ec. (2). En la fig. 5 se muestra dicha velocidad para la posición radial 0 cm. Relacionando el tiempo con la distancia que recorre el sensor se determinó que el movimiento a lo largo del chorro (fuera del tubo) le corresponde un tiempo que va de 0 hasta 0.183 s. En particular, la posición $x/d=6$ seleccionada para determinar la magnitud del flujo inverso le corresponde un tiempo de 0.283 s. Las zonas de flujo inverso se determinan por el signo negativo de la velocidad axial, indicando que este es un flujo en sentido contrario al flujo general.

DISCUSIÓN

Como se observa en la figura 5, la técnica del hilo caliente volador detecta el flujo axial inverso (velocidades negativas) en el centro del flujo en torbellino, tanto en la parte interior del tubo como en la parte del chorro (fuera del tubo). Además se observa que el flujo axial inverso es intermitente, se mantiene por algunas milésimas de segundo, desaparece y vuelve a aparecer.

Fig. 4: Velocidad axial relativa, U_r , a lo largo del eje del tubo.

Fig. 5: Velocidad del flujo, U , a lo largo del eje del tubo.

Con respecto a las mediciones de la velocidad relativa del flujo y su correspondiente velocidad del flujo calculada utilizando la ec. (2) para la estación axial $x/d=6$ y para posiciones radiales que van de 0 a 8 cm, se observó que la magnitud del flujo axial inverso va disminuyendo conforme se incrementa la posición radial, tal y como se observa en las figs. 6, 7, 8 y 9 las cuales corresponden a posiciones radiales de 1, 2, 3 y 4 cm respectivamente. La velocidad máxima medida del flujo axial inverso se obtuvo en el eje del tubo y fue de 0.55 m/s lo cual representa el 46 % de la velocidad axial máxima detectada (1.2 m/s) la cual se produce en una posición radial de 4.5 cm. El flujo axial inverso se detectó hasta una posición radial de 3 cm. A partir de la posición radial de 4 cm el flujo axial se mantiene positivo hasta un radio de 8 cm, posición radial máxima para la cual se realizaron mediciones. De las mismas figuras, también se observa que el flujo axial inverso se manifiesta en tiempos diferentes, es decir, en posiciones axiales diferentes por lo que no se pudo obtener el perfil de velocidad típico del flujo en torbellino mostrado en la fig. 1. Es conveniente aclarar que la medición de la velocidad relativa para cada posición radial se realizó en instantes diferentes debido a que no se cuenta con la facilidad de colocar varios sensores simultáneamente en el dispositivo utilizado.

Fig. 6: Velocidad del flujo a un radio de 1 cm.

Fig. 7: Velocidad del flujo a un radio de 2 cm.

Fig. 8: Velocidad del flujo a un radio de 3 cm.

Fig. 9: Velocidad del flujo a un radio de 4 cm.

CONCLUSIONES

El flujo axial inverso generado en el núcleo de un flujo en torbellino fue detectado empleando la técnica del hilo caliente volador hasta una posición radial de 3 cm ($r/r_o=0.326$). Esta velocidad es máxima en el centro del tubo, representando el 46 % de la velocidad axial máxima que ocurre en una posición radial de 4.5 cm y disminuye con la posición radial. A partir de un radio de 4 cm ya no se detecta el flujo axial inverso, es decir, la velocidad es positiva en cualquier instante del viaje del sensor. El flujo axial inverso no es constante durante el recorrido a velocidad máxima, es decir es intermitente cambiando de valores negativos a positivos y no manifiesta una tendencia a generar un perfil típico para un flujo en torbellino, es decir, la posición axial en la que se presenta el flujo inverso no es la misma en cada posición radial. Por lo anterior, no es posible elaborar una distribución radial de la velocidad axial empleando un solo sensor, para esto se requiere un conjunto de hilos calientes voladores con el fin de hacer mediciones simultáneas en diversas posiciones radiales. Finalmente, se concluye que en el núcleo del flujo en torbellino existe un flujo inverso intermitente semejante al flujo re-circulante que se genera en la estela de un cuerpo con movimiento relativo a una masa fluida.

REFERENCIAS

Benisek, M. H., M. R. Lecic, D. B. Ilic, D. S. Cantrak, Application of New Classical Probes in Swirl Fluid Flow Measurements, *Experimental Techniques*, Volume 34, No. 3, pages 74–81, (2010).

Bruun H. H., *Hot-Wire Anemometry, Principles and Signal Analysis*, Oxford Science Publication, (1995).

Cantrak, S., M. Benisek, M. Nedeljkovic, Contemporary Problems in Turbulent Swirling Flows, The Scientific Journal Facta Universitatis, Series: Mechanics, Automatic Control and Robotics, Vol. 2, No. 7/2, 369-380, (1997).

Chang, F., V. K. Dhir, Mechanisms of Heat Transfer Enhancement and Slow Decay of Swirl in Tubes Using Tangential Injection, Int. J. Heat and Fluid Flow, volume 16; 78-87, (1995).

Chang, K., C. Chen, Development of a Hybrid $k-\varepsilon$ Turbulence Model for Swirling Recirculating Flows Under Moderate to Strong Swirl Intensities, Int. J. Numer. Methods fluids, Vol. 16, 421-443 (1993).

Chen, J, B. S. Haynes, D. F. Fletcher, A Numerical and Experimental Study of Tangentially Injected Swirling Pipe Flows, Second International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries, CSIRO, Melbourne, Australia, 6-8 December (1999).

Cole, D. R., M.N. Glauser, Flying Hot-Wire Measurements in an Axisymmetric Sudden Expansion, Experimental Thermal and Fluid Science 18, 150-167, (1998).

Fernández-Roque T., Análisis del Flujo de Aire Generado por un Ventilador Axial en el Interior de un Tubo Circular Giratorio, Tesis de Maestría, SEPI ESIME Zacatenco-I.P.N., D. F., México (2003).

Harvey, J. K. Some Observations of the Vortex Breakdown Phenomenon, Journal of Fluid Mechanics, volume 14, 585-592, (1962).

Kelso R. M., T. T. Lim, A. E. Perry, A Novel Flying Hot-Wire System, Experiments in Fluids, 16, 181-186, (1994).

Kitoh, O. Experimental Study of Turbulent Swirling Flow in a Straight Pipe, Journal of Fluid Mechanics, volume 225, 445-479, (1991).

Moene, F., Swirling Pipe Flow with Axial Strain: Experiment and Large Eddy Simulation, Ph. D. thesis, Technische Universiteit Eindhoven, (2003).

Persoons T., A. Hoefnagels, E. Van den Bulck, Calibration of an Oscillating Hot-Wire Anemometer for Bidirectional Velocity Measurements, Experiments in Fluids 40, 555-567, (2006).

Sarpkaya, T., On Stationary and Traveling Vortex Breakdown, Journal of Fluid Mechanics, volume 45, 545-559, (1971).

Tinney, C. E., M. N. Glauser, E. L. Eaton, J. A. Taylor, Low-Dimensional Azimuthal Characteristics of Suddenly Expanding Axisymmetric Flows, Journal of Fluid Mechanics, vol. 567, pp. 141-155, (2006).

Vyas, B., J. Majdalani, M. J. Chiaverini, The Bidirectional Vortex. Part 1, An Exact Inviscid Solution; 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint, Propulsion Conference and Exhibit, Huntsville, AL., 20-23 July (2003).

Watmuff J. H., A. E. Perry, M. S. Chong, A Flying Hot-Wire System, Experiments in Fluids, 1, 63-71, (1983).

Widmann, J. F., S. R. Charagundla, C. Presser, Benchmark Experimental Database for Multiphase Combustion Model Input and Validation: Characterisation of the Inlet Combustion Air, National Institute of Standards and Technology, July (1999).